

11. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. et al. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии // Под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.

12. Spirin N., Gileva L., Lavrov V., Gordon Y., Yaroshenko Yu. The pilot expert system to control blast furnace operation // AISTech 2015 Iron and Steel Technology Conference and 7th International Conference on the Science and Technology of Iron-making, ICSTI 2015 (Cleveland, United States). Code 113707. 2015. Vol. 1. Pp. 1225-1232.

13. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Pavlov A.V. Use of Contemporary Information Technology for Analyzing the Blast Furnace Process // Metallurgist, 2016. Vol. 60. Iss. 5-6. Pp. 471-477.

УДК 669.162

Н. А. Спирин, О. П. Онорин, И. А. Гурин, В. В. Лавров, К. А. Щипанов
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЫРЬЕВЫМИ И ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Аннотация

Представлена структура модели оптимизации оптимального управления сырьевыми и топливно-энергетическими ресурсами в доменном цехе металлургического комбината. В основу системы положены блоки: 1) расчета комплекса параметров, характеризующих тепловой, газодинамический, шлаковый и дутьевой режимы каждой из доменных печей цеха за базовый период; 2) расчета коэффициентов линеаризованной модели (коэффициентов передачи по различным каналам воздействий) для каждой печи в отдельности свойств железорудного сырья, флюсующих добавок, дутьевых параметров, параметров комбинированного дутья на технико-экономические показатели работы отдельных печей и их тепловой, газодинамический и шлаковый режимы доменной плавки для условий базового с использованием модели доменного процесса УрФУ–ММК; 3) решения задачи оптимального распределения сырьевых и топливно-энергетических ресурсов для проектного периода работы доменных печей; 4) анализа полученных результатов и выдачи рекомендаций по оптимизации параметров доменных печей. Проиллюстрирована разработанная функциональная модель оптимального распределения сырьевых и энергетических ресурсов для инженерно-технологического персонала доменного цеха, определены основные функции и взаимосвязи между отдельными функциональными блоками. Отражены функции созданного программного обеспечения «Оптимальное управление сырьевыми и топливно-энергетическими ресурсами в доменном производстве», реализованного виде web-приложения в среде программирования Microsoft Visual Studio 2017 (язык программирования C#). Программный продукт позволяет инженерно-технологическому персоналу доменного цеха металлургического комбината решать задачи оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов (расхода природного газа и кислорода) в группе доменных печей в различных технологических ситуациях.

Ключевые слова: доменное производство, оптимизация распределения ресурсов, топливно-энергетические ресурсы, сырьевые ресурсы, функциональное моделирование, система поддержки принятия решений, разработка программного обеспечения.

Abstract

The structure of optimization model of optimal management of raw materials, fuel and energy resources in the blast-furnace shop of iron and steel works is represented. The following blocks are taken as system basis: 1) calculation of the set of parameters that characterize the thermal, gas-dynamic, slag and blasting modes for every blast furnaces of the shop during the base period; 2) calculation of linearized model coefficients (constants of transferring via different exposure pathways) individually for every blast furnace as well as properties of iron ore raw materials, fluxing additions, blasting parameters, parameters of fuel-enriched blast influencing the technical-and-economic indices of separate furnaces performance, their thermal, gas-dynamic and slag operation modes in the course of blast-furnace melting according to UrFU–MMT blast-furnace production model within the base period; 3) solution of tasks that consider the optimal allocation of raw materials, fuel and energy resources for the project period of blast furnaces operation; 4) analysis of obtained results and providing of recommendations on the optimization of blast furnaces parameters. The developed functional model of optimal distribution of raw materials, fuel and energy resources for the engineering and technology personnel of blast-furnace shop is illustrated; the main functions and interconnections between the separate functional blocks are defined. The functions of created “Optimal management of raw materials, fuel and energy resources in the blast-furnace production” software that is realized in the Microsoft Visual Studio 2017 (C# programming language) programming environment in the form of web application are pointed out. The program product provides the engineering and technology personnel of blast furnace shop of iron and steel works with the opportunity to solve the tasks of optimal distribution of fuel and energy resources (natural gas and oxygen consumption) within the group of blast furnaces in the different technological situations.

Key words: blast-furnace production, resources distribution optimization, fuel and energy resources, raw material resources, functional modeling, decision support system, software development.

Введение. Для решения задач управления комплексами сложных и энергоёмких технологических агрегатов в пирометаллургии должны использоваться современные автоматизированные системы оптимального управления сырьевыми и топливно-энергетическими ресурсами. Особое место в этом комплексе технологических операций получения металлопродукции отводится доменному переделу как самому ресурсоемкому, энергоёмкому и сложному, на долю которого приходится до 50 % топлива, используемого в чёрной металлургии.

Анализ современного состояния управления комплексом доменных печей позволяет сделать вывод о том, что следует сосредоточиться на решении актуальной научно-практической задачи создания автоматизированной подсистемы оптимального управления сырьевыми и топливно-энергетическими ресурсами и прогнозирования работы комплекса доменных печей в условиях изменения конъюнктуры рынка сырья и топлива, нестабильности состава и качества проплавляемого железорудного сырья на основе разработки и применения новых методов и алгоритмов [1-5]. Интеллектуальным ядром такой системы являются математические модели технологических процессов и производств [6-8].

Структура модели. Структура модели оптимизации оптимального управления сырьевыми и топливно-энергетическими ресурсами в доменном цехе представлена рис. 1 и включает следующие основные блоки:

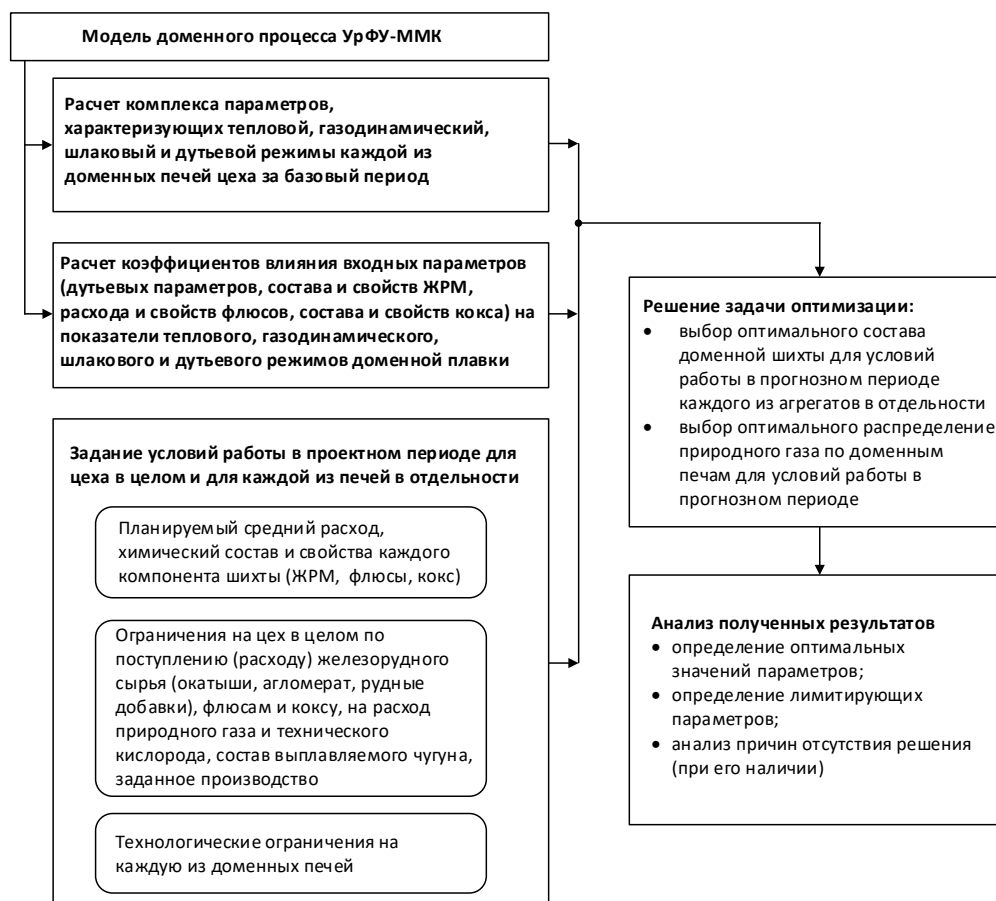


Рис. 1. Структура модели оптимизации оптимального управления сырьевыми и топливно-энергетическими и ресурсами в доменном цехе

1. Расчет комплекса параметров, характеризующих тепловой, газодинамический, шлаковый и дутьевой режимы каждой из доменных печей цеха за базовый период. Оценка параметров доменной плавки выполнена с использованием разработанной в рамках натурно-модельного подхода балансовой модели доменного процесса, которую условно можно разделить на две части – модель базового состояния и прогнозирующую модель [8-11]. Модель базового (эталонного) состояния позволяет оценить состояние каждой доменной печи и влияние входных параметров на тепловой, газодинамический и шлаковый режимы доменной плавки с использованием всей фактически доступной информации о параметрах шихты, комбинированного дутья, колошникового газа и продуктов плавки. Прогнозирующая модель на основании результатов, полученных с помощью модели базового (эталонного) состояния, позволяет оценить показатели доменного процесса в случае изменения условий плавки. В базовом периоде известны показатели работы доменных печей и цеха в целом по данным технического отчета доменного цеха. Для этого используется программное обеспечение УрФУ–ММК и подсистема «Технический отчет доменного цеха» [9-11]. Общее количество показателей технического отчета составляет более 300. С использованием программного модуля «АРМ технолога доменного цеха» осуществляется расчет комплекса параметров, характеризующих тепловой, газодинамический, шлаковый и дутьевой режимы каждой из доменных печей цеха за базовый период (около 30 параметров на каждой печи) [9, 11].

2. *Расчет коэффициентов линеаризованной модели.* Осуществляется расчет коэффициентов влияния (коэффициентов передачи по различным каналам воздействий) для каждой печи в отдельности свойств железорудного сырья, флюсующих добавок, дутьевых параметров, параметров комбинированного дутья на технико-экономические показатели работы отдельных печей и их тепловой, газодинамический и шлаковый режимы доменной плавки для условий базового периода с использованием модели доменного процесса [10]. В дальнейшем эти коэффициенты для данной печи, учитывая линейность модели, считаются постоянными по отношению к выбранному базовому периоду при решении задач прогноза. Оценивается возможность линеаризации математической модели доменного процесса для условий работы отдельных печей, определяются возможные пределы изменений сырьевых, дутьевых и режимных параметров и применения для решения задачи оптимизации методов линейного математического программирования. При этом используются методы оценки линейности доменного процесса, разработанные ранее и представленные в работах [9, 11].

Таким образом, в целях повышения надежности оценок в модели использованы соотношения в приращениях, позволяющие свести задачу к задаче линейного математического программирования и исключить влияние инструментальных и систематических погрешностей информационных каналов.

В дальнейшем осуществляется решение задачи оптимального распределения сырьевых и топливно-энергетических ресурсов для проектного периода. Для этого предусмотрены следующие блоки:

- *Задание условий работы в проектном периоде для цеха в целом и для каждой из печей в отдельности.*

- Осуществляется задание планируемого среднего расхода, химического состава и свойств каждого компонента шихты, в том числе железорудных материалов, флюсов, кокса. С использованием пересчетных коэффициентов модели и по справочным данным (технологической инструкции), принятым для условий работы доменного цеха в целом, рассчитывается планируемое производство на цех в целом и осуществляется распределение производства по каждой доменной печи в прогнозном периоде. Учет технического состояния каждой из печей, графиков их ремонтов, планируемых остановок печей осуществляется методом экспертной оценки.

- Задание ограничений на цех в целом по поступлению (расходу) железорудного сырья (окатыши, агломерат, рудные добавки), флюсам и коксу, на расход природного газа и технического кислорода, состав выплавляемого чугуна, заданное производство.

- Задание технологических ограничений на каждую из доменных печей, характеризующих тепловой, газодинамический и шлаковый режим доменной плавки, состав и свойства выплавляемого чугуна.

- *Решается задача выбора оптимального состава доменной шихты для условий работы в прогнозном периоде каждого из агрегатов в отдельности.* Осуществляется решение задачи оптимального состава доменной шихты каждой

печи при заданном соотношении расхода агломерата и окатышей, с возможностью корректировки флюса и основности агломерата с учетом ограничений на тепловой, шлаковый и газодинамический режимы плавки. При этом предусмотрены следующие варианты решения задач в порядке приоритета:

- корректировка состава шихты соотношением расходов агломерат/окатыши при отсутствии флюсующих добавок;
- корректировка состава шихты только расходами флюсующих добавок;
- возможна любая комбинация указанных вариантов.
- *Решается задача выбора оптимального распределение природного газа по доменным печам для условий работы в прогнозном периоде для этого:*
 - формализуются ограничения на тепловой, газодинамический и шлаковый режим доменной плавки каждой из печей цеха;
 - формализуются ограничения в целом по цеху на расходы топливно-энергетических ресурсов: расходы природного газа, технологического кислорода, кокса, производства чугуна;
 - соотношение расходов природного газа и технологического кислорода задается из условия сохранения поддержания температуры горения на фурмах на заданном интервале.
 - целевая функция задается как задача минимизации расхода кокса.
- *Анализ полученных результатов.* Особенность решения сложных оптимизационных задач математического программирования связана с тем, что в процессе решения могут возникнуть такие случаи, когда ограничения, наложенные на режимы работы печи, противоречивы, т.е. отсутствует область допустимых решений. В связи с этим в алгоритме решения предусмотрен этап анализа решения задачи. В случае отсутствия допустимой области решения задачи и противоречивости условий используется этапом коррекции, т.е. оценить корректность использования шихтовых материалов, ограничений, надежность исходной информации и т.д.

Функциональное моделирование оптимального распределения сырьевых и энергетических ресурсов. В основу метода, используемого при создании функциональной модели, положены идеи и нотации методики структурного анализа и проектирования IDEF0 (Integrated computer aided manufacturing DEFinition). Использование этой методики позволило создать функциональную структуру программного комплекса, выявить производимые им действия и связи между этими действиями, управляющие воздействия и механизмы выполнения каждой функции.

В результате на основе системного подхода разработана функциональная модель оптимального распределения сырьевых и энергетических ресурсов для инженерно-технологического персонала доменного цеха, определены основные функции и взаимосвязи между отдельными функциональными блоками. Общее количество декомпозированных блоков функциональной модели составляет 115, фрагмент представлен на рис. 2.

Функция «Подготовить исходные данные для расчета» (A1) обеспечивает извлечение из базы данных доменного производства необходимых фактических

отчетных показателей работы доменных печей, характеризующих тепловой, газодинамический, шлаковый и дутьевой режимы каждой из доменных печей цеха за базовый период, а также их усреднение за заданный пользователем период; задание стоимостных характеристик всех видов топливно-сырьевых ресурсов; расчет всех коэффициентов линеаризованной модели УрФУ–ММК по оценке влияния входных параметров (дутьевых параметров, состава и свойств ЖРМ, расхода и свойств флюсов, состава и свойств кокса) на показатели теплового, газодинамического, шлакового и дутьевого режимов доменной плавки.

Функция «Сформировать ограничения и выполнить расчеты для базового периода» (A2) обеспечивает для базового периода: формирование ограничений на цех в целом по поступлению (расходу) железорудного сырья (окатыши, агломерат, рудные добавки), флюсам и коксу, на расход природного газа и технического кислорода, состав выплавляемого чугуна, заданное производство; формирование технологических ограничений на каждую доменную печь (теоретическая температура горения; обобщенный показатель теплового состояния низа печи; отношение теплоёмкостей потоков в шахте; степень уравнивания шихты; свойства шлака (вязкость шлака при различных температурах, градиенты вязкости); содержание серы и кремния в чугуне; расход природного газа по печам; расход кокса на печь); расчет задачи оптимизации для базового периода.

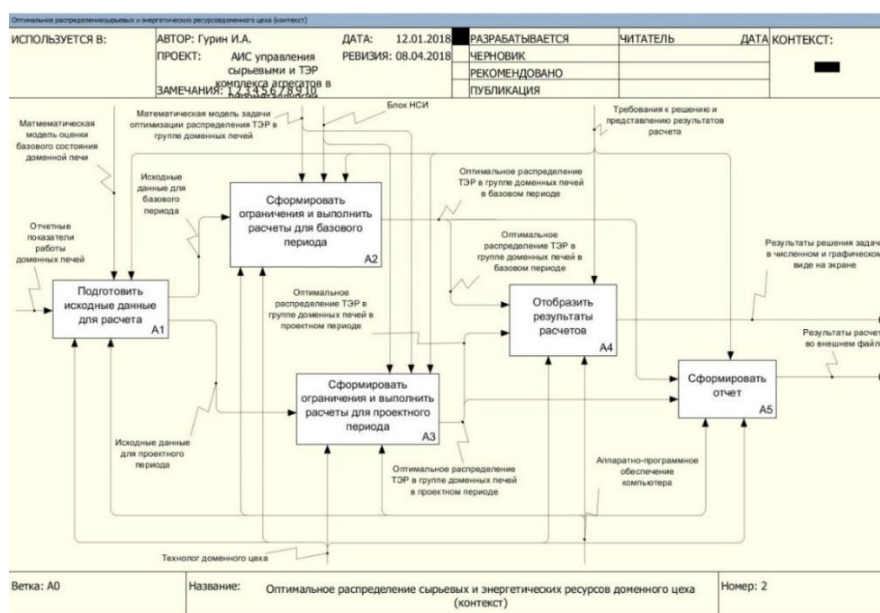


Рис. 2. Первый уровень декомпозиции функциональной модели оптимального распределения сырьевых и энергетических ресурсов

Функция «Сформировать ограничения и выполнить расчеты для проектного периода» (A3) обеспечивает задание в проектном периоде: планируемого среднего расхода, химического состава и свойств каждого компонента шихты (ЖРМ, флюсов, кокса); формирование ограничений на цех в целом по поступлению (расходу) железорудного сырья (окатыши, агломерат, рудные добавки), флюсам и коксу, на расход природного газа и технического кислорода, состав выплавляемого чугуна, заданное производство; технологических ограничений на каждую из доменных печей; расчет задачи оптимизации для проектного периода.

Функция «*Отобразить результаты расчета*» (A4) обеспечивает отображение результатов решения задачи оптимизации на экранной форме в численном и графическом виде.

Функция «*Сформировать отчет*» (A5) позволяет подготовить перечень показателей для экспорта во внешний файл распространенных форматов офисных документов (Word, Excel, CSV, PDF и др.).

Математическое, алгоритмическое и информационное обеспечение. Структурный системный анализ и проектирование блоков математических моделей выполнены на основе процедурно-ориентированного подхода. Основой данного подхода является использование диаграмм потоков данных DFD (Data Flow Diagrams) информационной модели, основными компонентами которой являются потоки данных, переносящие информацию от одного модуля к другому. Нотация метода DFD предполагает разбиение математической модели на отдельные функциональные компоненты (процессы) и представление их в виде сети, связанной потоками данных.

Выбор оптимального состава доменной шихты. Блок-схема решения задачи расчёта оптимального состава доменной шихты отражена на рис. 3.

Оптимизационная модель включает в себя два основных компонента: целевую функцию и технологические ограничения на каждую доменную печь.

Расчет оптимального распределение природного газа. Оптимальное распределение топливно-энергетических ресурсов в группе доменных печей, в частности инжектируемого топлива и технологического кислорода, в пределах группы доменных печей является актуальной задачей, поскольку технологические показатели работы отдельных печей существенно различаются. При заданном на доменный цех общем расходе этих ресурсов целесообразно иметь оперативную методику оценки эффективности использования указанных ресурсов на доменных печах и осуществлять их оптимальное распределение. На рис. 4 отражена блок-схема решения задачи оптимизации распределения топливно-энергетических ресурсов в группе доменных печей.

Предусмотрены следующие варианты целевых функций:

- минимум удельного расхода кокса:

$$Z = K \rightarrow \min_{X_{i,ш} \in G_{x_{ш}}} ; \quad (1)$$

- максимум производительности:

$$Z = P \rightarrow \max_{X_{i,ш} \in G_{x_{ш}}} . \quad (2)$$

где i – индекс вида шихтовых материалов и топливно-энергетических ресурсов; $X_{i,ш}$ – вектор, характеризующий виды, расходы и химический состав i -х материалов доменной шихты, топливно-энергетических ресурсов; $X_{i,ш} \in G_{x_{ш}}$ – ограничения на параметры шихты, т.е. виды, химические составы, физические свойства загружаемых шихтовых материалов и топливно-энергетических ресурсов; $G_{x_{ш}}$ – область допустимых решений параметров шихты и топливно-энергетических ресурсов.

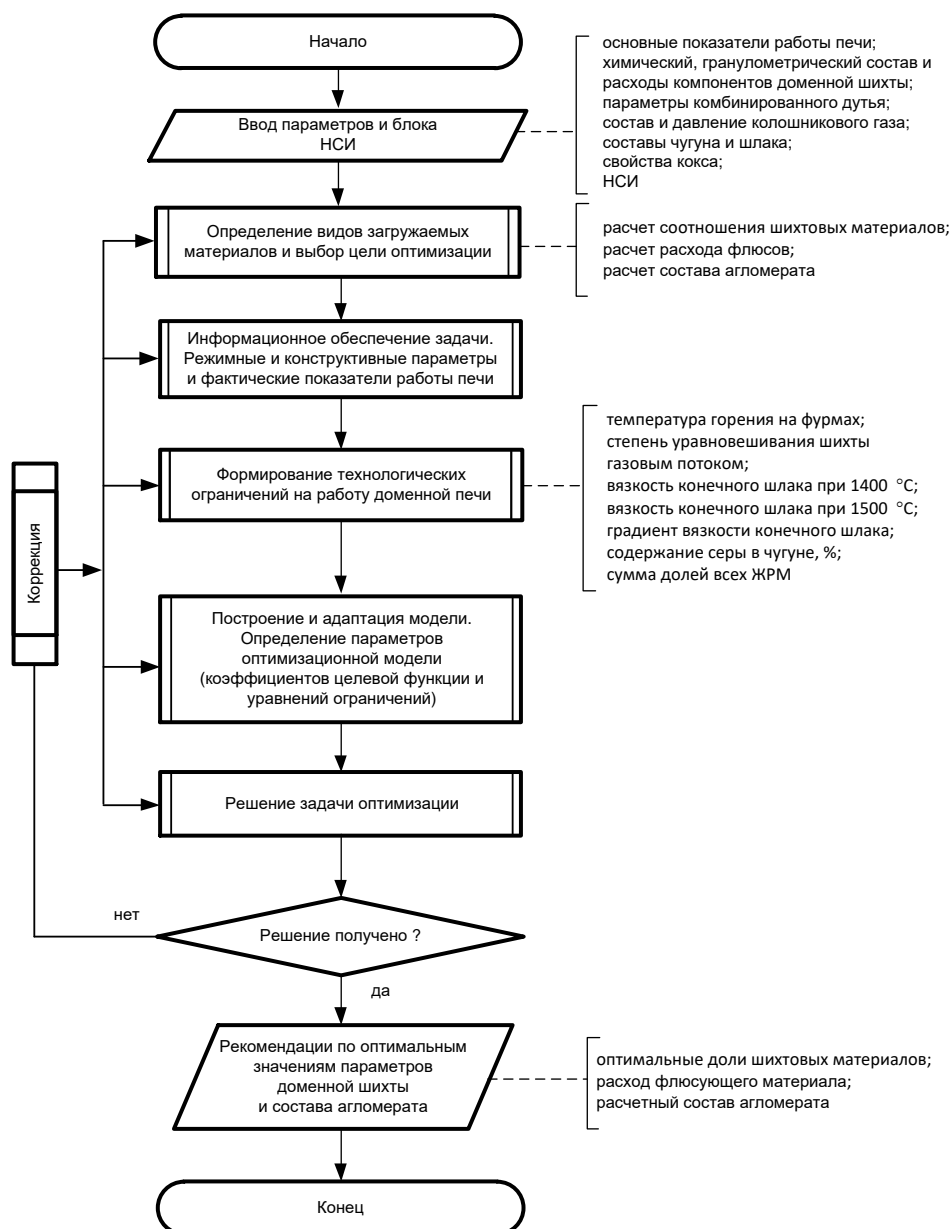


Рис. 3. Последовательность решения задачи расчёта оптимального состава доменной шихты

Формирование технологических ограничений предусматривает учёт и математическое описание ограничений на тепловой, газодинамический и шлаковый режимы плавки.

Программное обеспечение «Оптимальное управление сырьевыми и топливно-энергетическими ресурсами в доменном производстве» виде web-приложения разработано в соответствии с современными принципами построения прикладных программ (функциональность, расширяемость, интеграция с базами данных, интуитивно-понятный пользовательский интерфейс, безопасность, оценивание информации). В основе программной реализации лежит технология .NET, что дает дополнительную свободу при выборе платформы, а также языка программирования. Программный продукт написан на языке C# с использованием среды разработки Microsoft Visual Studio 2017.

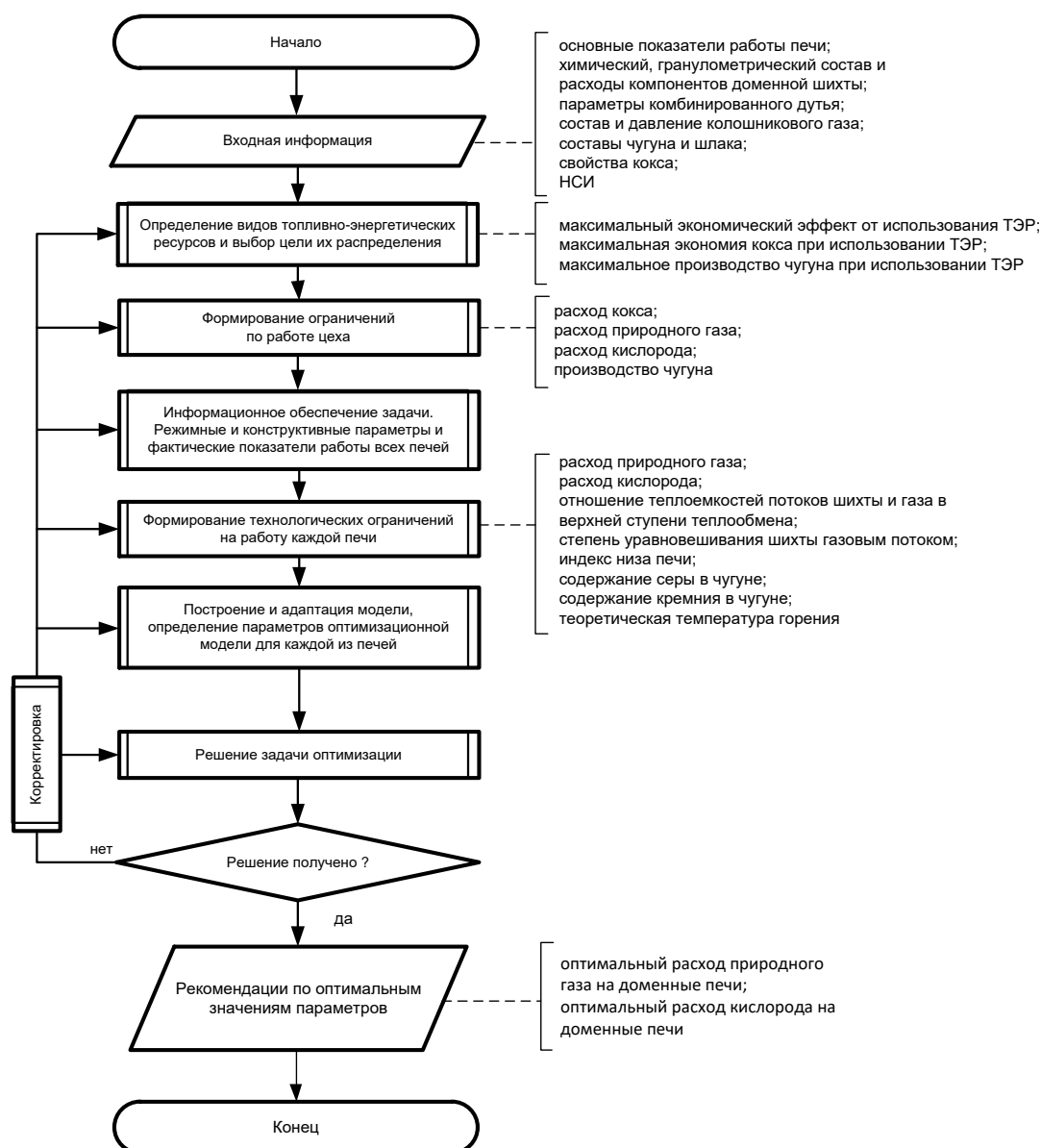


Рис. 4. Блок-схема решения задачи оптимизации распределения топливно-энергетических ресурсов в группе доменных печей

Программное обеспечение выбора оптимального состава доменной шихты предусматривает решение следующих технологических задач:

- подбор оптимального соотношения долей агломерата и одного из видов привозных окатышей (из выпадающего списка выбирается материал, с помощью которого должна производиться корректировка шихты для получения заданной основности шлака);
- подбор расхода одного из видов флюсующих материалов (из выпадающего списка выбирается вид флюса, с помощью которого должна производиться корректировка шихты для получения заданной основности шлака);
- подбор химии (основности) агломерата в проектный период при заданных расходах или долях железорудных материалов и флюсов.

Программное обеспечение подсистемы расчёта оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов позволяет решать задачи оптимального

распределения расхода природного газа и кислорода в следующих технологических ситуациях:

- при изменении объёма ресурсов по расходу природного газа и кислорода для цеха в целом;
- для определения максимального объёма ресурсов комбинированного дутья, которое может использовать комплекс доменных печей;
- при изменении ресурса по объёму кокса, имеющегося в распоряжении цеха;
- при изменении требований задания на объем выплавляемого чугуна комплексом доменных печей;
- при изменении конъюнктуры рынка, т.е. требований обеспечения максимума экономии кокса, обеспечения максимума производства, экономичности работы комплекса печей, цен на топливно-энергетические ресурсы и т.п.

Заключение

1. Создана функциональная модель системы оптимального управления сырьевыми и топливно-энергетическими ресурсами в доменном производстве.

2. Реализованы структуры подсистем:

- выбора оптимального состава доменной шихты, позволяющая с учётом заданных технологических ограничений на шлаковый, газодинамический и тепловой режимы доменных печей определять необходимое соотношение шихтовых материалов, расход флюсов и состав агломерата для обеспечения его заданной основности;

- оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов в группе доменных печей в различных технологических ситуациях (сохранение или изменение общего расхода природного газа, кислорода, кокса для цеха в целом; корректировка режимных и конструктивных параметров печей, входящих в рассматриваемую группу; изменение конъюнктуры рынка), отличающаяся учётом технологических ограничений на работу отдельных печей.

3. Создана совокупность алгоритмов оптимального распределения сырьевых и топливно-энергетических ресурсов между печами доменного цеха с учётом технологических ограничений в условиях нестабильности состава и качества проплавляемого железорудного сырья и топлива, а также при изменении конъюнктуры рынка.

4. С использованием современных технологий разработано соответствующее программное обеспечение.

Список использованных источников

1. Porzio G.F., Colla V., Matarese N. et al. Process integration in energy and carbon intensive industries: An example of exploitation of optimization techniques and decision support // Applied thermal engineering. 2014. Vol. 70. Iss. 2. Pp. 1148-1155.

2. Bandyopadhyay S., Sahu G. C. Minimization of resource requirement and inter-plant cross flow across resource allocation networks // Chemical Engineering Transactions. 2011. Volume 25. Pages 279-284.

3. Froehling M., Schwaderer F., Bartusch H. et al. Integrated planning of transportation and recycling for multiple plants based on process simulation // European journal of operational research. 2010. Vol. 207. Iss. 2. Pp. 958-970.
4. Ganjehkaviri A., Mohd Jaafar M. N. et al. Modelling and optimization of combined cycle power plant based on exergoeconomic and environmental analyses // Applied thermal engineering. 2014. Vol. 67. Iss. 1-2. Pp. 566-578.
5. Martin E., Meis M., Mourenza C. et al. Fast solution of direct and inverse design problems concerning furnace operation conditions in steel industry // Applied thermal engineering. 2012. Vol. 47. Pp. 41-53.
6. Kuang S., Li Z., Yu A. Review on Modeling and Simulation of Blast Furnace // Steel research international. 2018. Vol. 89. Iss. 1. Code UNSP 1700071.
7. Ariyama T., Natsui S., Kon T. et al. Recent Progress on Advanced Blast Furnace Mathematical Models Based on Discrete Method // ISIJ international. 2014. Vol. 54. Iss. 7. Pp. 1457-1471.
8. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. et al. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии // Под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.
9. Spirin N.A., Lavrov V.V., Burykin A.A. et al. Complex of model systems for supporting decisions made in managing blast-furnace smelting technology // Metallurgist. 2011. Vol. 54. No. 9–10. Pp. 566-569.
10. Spirin N., Gileva L., Lavrov V., Gordon Y., Yaroshenko Yu. The pilot expert system to control blast furnace operation // AISTech 2015 Iron and Steel Technology Conference and 7th International Conference on the Science and Technology of Iron-making, ICSTI 2015 (Cleveland, United States). Code 113707. 2015. Vol. 1. Pp. 1225-1232.
11. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Y., Krasnobaev A.V., Pavlov A.V. Use of Contemporary Information Technology for Analyzing the Blast Furnace Process // Metallurgist. 2016. Vol. 60. Iss. 5-6. Pp. 471-477.

УДК 004.681

А. И. Сунаргулова

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И.Носова», г. Магнитогорск, Россия

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ДСП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОЦЕНКИ НАЛИЧИЯ ТРЕНДА ПО КРИТЕРИЮ ВОСХОДЯЩИХ И НИСХОДЯЩИХ СЕРИЙ

Аннотация

Объект исследования – дуговая сталеплавильная печь переменного тока (ДСП). Для управления электрическими параметрами ДСП целесообразно применять системы экстремального регулирования статистического типа. Целью данной работы является разработка и исследование системы автоматической оптимизации управления